



بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

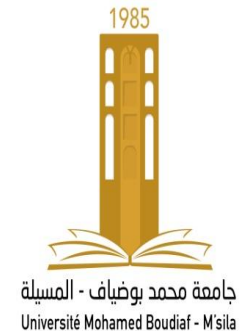
السَّلَامُ عَلَیْكُمْ

وَرَحْمَةُ اللّٰهِ وَبَرَكَاتُهُ

1985



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE M'SILA



Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : Physique

Option : Physique théorique

Thème:

**VIOLATION DE CP DANS L'INTERFÉRENCE POUR LES
MÉSONS K DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD**

présenté par:
BOUSSAG KARIMA

Encadré par:
Pr. BOUSSAHEL MOUNIR



TABLE DES MATIÈRES

1- INTRODUCTION GÉNÉRALE

2- MODÈLE STANDARD

3- VIOLATION DE CP DANS LE MODÈLE STANDARD

4- DÉSINTÉGRATIONS DE MÉSONS K ET ETATS PROPRES DE CP

5- TYPES DE VIOLATION DE CP DANS LE SYSTÈME K

6- VIOLATION DE CP DANS L'INTERFÉRENCE

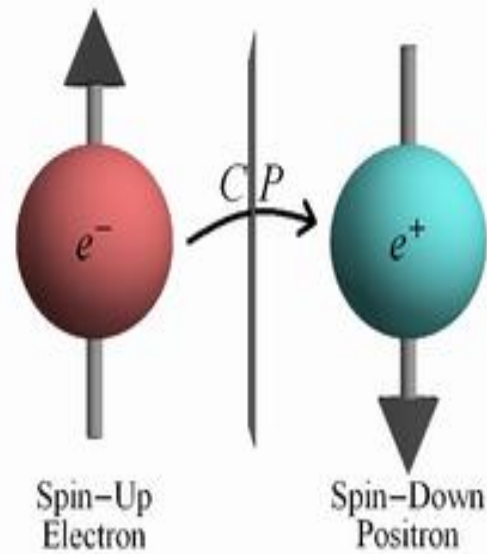
7- CONCLUSION

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1

La violation de CP est un problème essentiel qui constitue un axe de recherche très important dans la physique des particules, elle est une des composantes nécessaires pour expliquer l'asymétrie matière-antimatière que l'on observe dans l'univers.

La violation de CP a été mise en évidence par **CHRISTENSON, CRONIN, FITCH** et **TURLAY** en **1964** au laboratoire de **Brookhaven**, dans le système des **mésons K neutres**.



MODÈLE STANDARD

2

LE MODÈLE STANDARD DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES



$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

le groupe de charge de couleur. (force forte)

le groupe de l'isospin (force faible)

le groupe de l'hypercharge (force électromagnétique)

types des particules :

Fermions

bosons

Particules

Bosons "Rayonnement"

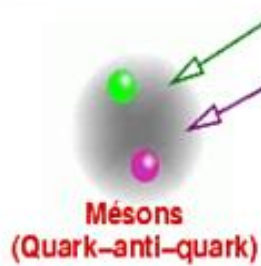
gluons	W^+	Z^0	photon
	W^-		

Fermions "Matière"

Quarks	Anti-quarks	Leptons	Anti-leptons
d u	\bar{d} \bar{u}	e^- ν_e	e^+ $\bar{\nu}_e$
s c	\bar{s} \bar{c}	μ^- ν_μ	μ^+ $\bar{\nu}_\mu$
b t	\bar{b} \bar{t}	τ^- ν_τ	τ^+ $\bar{\nu}_\tau$

Elémentaires

125 GeV
H
Higgs boson



Composites
(Hadrons)

**VIOLATION DE CP DANS
LE MODÈLE STANDARD**

3

LE MODÈLE STANDARD

L'opérateur **CP** pour un spineur de champs fermioniques

$$(CP)\Psi_{L,R}(\vec{x},t)(CP)^{-1} = i\gamma^2\gamma^0\Psi_{L,R}^*(-\vec{x},t)$$

lagrangien de courant chargé

$$L_{cc} = W_\mu^+ \bar{u} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) V_{CKM} d + W_\mu^- \bar{d} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) V_{CKM}^+ u$$

CP

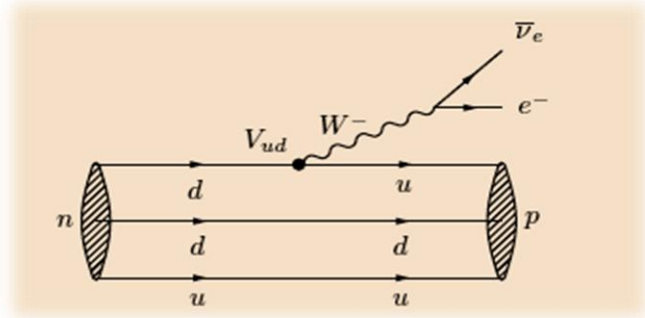


$$L_{cc} = W_\mu^- \bar{d} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) V_{CKM}^T u + W_\mu^+ \bar{u} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) V_{CKM}^* d$$

V_{CKM}
réelle

V la matrice **CKM**

$$|V_{ud}|$$



$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Expérimentalement V est donné par :

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 0.97428 & 0.2253 & 0.00347 \\ 0.2252 & 0.97345 & 0.0410 \\ 0.00862 & 0.0403 & 0.999152 \end{pmatrix} \pm \begin{pmatrix} 0.00015 & 0.0007 & 0.00016 \\ 0.0007 & 0.00016 & 0.0011 \\ 0.00026 & 0.0011 & 0.000045 \end{pmatrix}$$

paramétrisations de la matrice CKM :

standard

Wolfeinstein

**DÉSINTÉGRATIONS DE MÉSONS K
ET ETATS PROPRES DE CP**

4

Modes de désintégration

Hadronique

$$K^0, \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$$

$$K^0, \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

$$K^0, \bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$$

Semi leptonique

$$\left. \begin{aligned} K^0 &\rightarrow \pi^- l^+ \nu_l \\ \bar{K}^0 &\rightarrow \pi^+ l^- \bar{\nu}_l \end{aligned} \right\} l = e, \mu$$

Etats propres de CP

$$CP |K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$$

$$CP |\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$$

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle]$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle]$$

Les états propres de l'hamiltonien faibles

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{(1 + |\varepsilon|^2)}} \{ |K_2^0\rangle + \varepsilon |K_1^0\rangle \} \quad |K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{(1 + |\varepsilon|^2)}} \{ |K_1^0\rangle + \varepsilon |K_2^0\rangle \}$$

ε

Un paramètre très petit et complexe

**TYPES DE VIOLATION DE CP
DANS LE SYSTÈME K**

5

les effets observables de la violation de CP

peuvent être classés en trois types:

- La violation de CP dans le mélange.
- La violation de CP dans la désintégration.
- La violation de CP dans l'interférence entre désintégration avec ou sans mélange.

L'hamiltonien H de système

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12}^* & H_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12}^* & M_{22} \end{pmatrix} - \frac{i}{2} \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{12}^* & \Gamma_{22} \end{pmatrix}$$

$$M_{12} = e^{i\theta_M} |M_{12}|$$

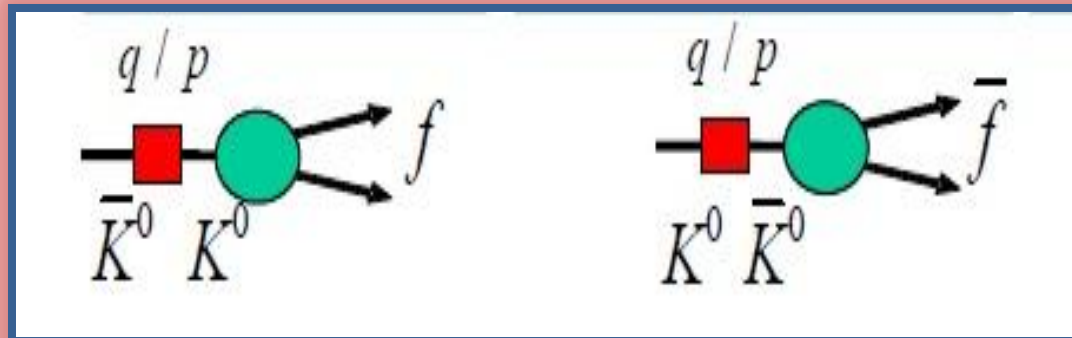
$$\Gamma_{12} = e^{i\theta_D} |\Gamma_{12}|$$

1. Violation de CP dans le mélange

$$(K^0 - \bar{K}^0)$$

Souvent appelée violation de CP d'un système indirecte.

$$(\bar{K}^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow \bar{f}) \quad \text{Et} \quad (\bar{K}^0 \rightarrow K^0 \rightarrow f)$$



$$\left| \frac{q}{p} \right| = 1$$

CP conservée

$$\left| \frac{q}{p} \right|^2 = \left| \frac{M_{12}^* - \frac{i}{2} \Gamma_{12}^*}{M_{12} - \frac{i}{2} \Gamma_{12}} \right|$$

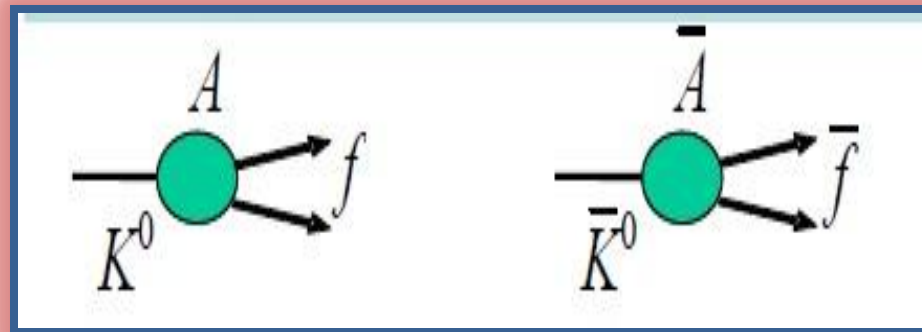
$$\left| \frac{q}{p} \right| \neq 1$$

violation de CP

2. Violation de CP dans la désintégration

Souvent appelée violation de CP d'un système directe.

$$(K^0 \rightarrow f) \text{ Et } (\bar{K}^0 \rightarrow \bar{f})$$



$$\left| \frac{\bar{A}}{A} \right| = 1$$

$$\left| \frac{\bar{A}}{A} \right| = \left| \frac{\sum_i A_i e^{i\delta_i} e^{-i\phi_i}}{\sum_i A_i e^{i\delta_i} e^{i\phi_i}} \right|$$

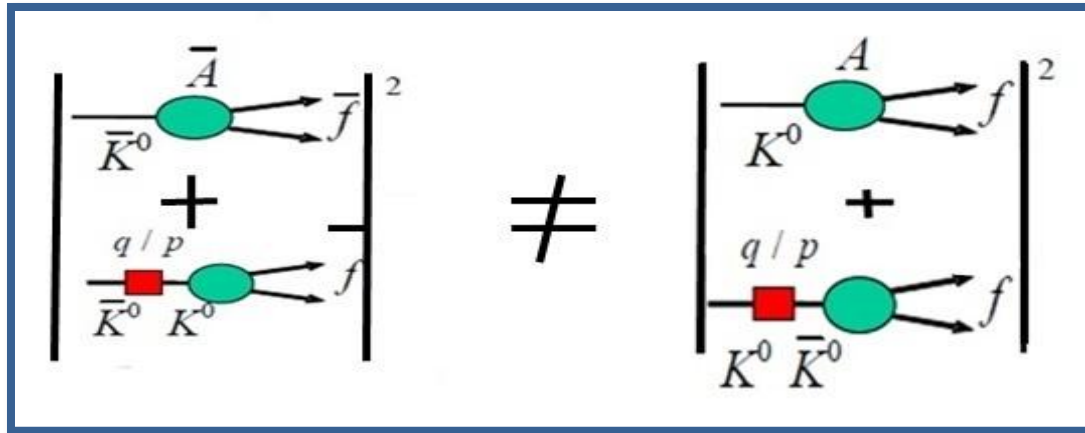
$$\left| \frac{\bar{A}}{A} \right| \neq 1$$

CP conservée

violation de CP

3. Violation de CP dans l'interférence

$$(K^0 \rightarrow f) \text{ Et } (K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow \bar{f})$$



$$\lambda_f = 1$$

CP conservée

$$\lambda_f = \frac{q}{p} \frac{\overline{A_f}}{A_f}$$

$$\lambda_f \neq 1$$

violation de CP

**VIOLATION DE CP DANS
L'INTERFÉRENCE**

6

Evolution dans le temps :

$$|K^0(t)\rangle = g_+(t) |K^0\rangle + \frac{q}{p} g_-(t) |\overline{K^0}\rangle$$

$$|\overline{K^0}(t)\rangle = g_-(t) \frac{p}{q} |K^0\rangle + g_+(t) |\overline{K^0}\rangle$$

$$g_+(t) = \frac{1}{2} \left(e^{-im_S t - \frac{1}{2}\Gamma_S t} + e^{-im_L t - \frac{1}{2}\Gamma_L t} \right)$$

$$g_-(t) = \frac{1}{2} \left(e^{-im_S t - \frac{1}{2}\Gamma_S t} - e^{-im_L t - \frac{1}{2}\Gamma_L t} \right)$$

$$\Gamma_{K^0 \rightarrow f}(t) \propto |\langle f | T | K^0 \rangle|^2$$

Ce qui nous permet d'écrire les taux de décroissance par :

$$\Gamma_{K^0 \rightarrow f}(t) = |A_f|^2 \left(|g_+(t)|^2 + |\lambda_f|^2 |g_-(t)|^2 + 2\mathcal{R}e[\lambda_f g_+^*(t) g_-(t)] \right) \quad (1)$$

$$\Gamma_{K^0 \rightarrow \bar{f}}(t) = |\bar{A}_{\bar{f}}|^2 \left| \frac{q}{p} \right|^2 \left(|g_-(t)|^2 + |\bar{\lambda}_{\bar{f}}|^2 |g_+(t)|^2 + 2\mathcal{R}e[\bar{\lambda}_{\bar{f}} g_+(t) g_-^*(t)] \right) \quad (2)$$

$$\Gamma_{\overline{K^0} \rightarrow f}(t) = |A_f|^2 \left| \frac{p}{q} \right|^2 \left(|g_-(t)|^2 + |\lambda_f|^2 |g_+(t)|^2 + 2\mathcal{R}e[\lambda_f g_+(t) g_-^*(t)] \right) \quad (3)$$

$$\Gamma_{\overline{K^0} \rightarrow \bar{f}}(t) = |\bar{A}_{\bar{f}}|^2 \left(|g_+(t)|^2 + |\bar{\lambda}_{\bar{f}}|^2 |g_-(t)|^2 + 2\mathcal{R}e[\bar{\lambda}_{\bar{f}} g_+^*(t) g_-(t)] \right) \quad (4)$$

$|A|^2$ \longrightarrow des désintégrations sans oscillation

$|A_f|^2 \left| \frac{q}{p} \right|^2$ ou $|A_f|^2 \left| \frac{p}{q} \right|^2$ \longrightarrow des désintégrations après une oscillation nette

$\mathcal{R}e g^* g$ \longrightarrow l'interférence entre les deux cas

Avec :

$$|g_{\pm}(t)|^2 = \frac{e^{-\Gamma t}}{2} \left(\cosh \frac{\Delta\Gamma t}{2} \pm \cos \Delta m t \right)$$

$$g_+^*(t)g_-(t) = \frac{e^{-\Gamma t}}{2} \left(\sinh \frac{\Delta\Gamma t}{2} + i \sin \Delta m t \right) \quad g_+(t)g_-^*(t) = \frac{e^{-\Gamma t}}{2} \left(\sinh \frac{\Delta\Gamma t}{2} - i \sin \Delta m t \right)$$

Donc les taux de décroissance pour $K^0, \bar{K}^0 \rightarrow f$ décrits comme :

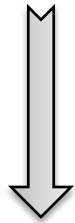
$$\Gamma_{K^0 \rightarrow f}(t) = |A_f|^2 \frac{e^{-\Gamma t}}{2} \left((1 + |\lambda_f|^2) \cosh \frac{\Delta\Gamma t}{2} + 2\mathcal{R}e\lambda_f \sinh \frac{\Delta\Gamma t}{2} + (1 - |\lambda_f|^2) \cos \Delta m t - 2\mathcal{I}m \lambda_f \sin \Delta m t \right)$$

$$\Gamma_{\bar{K}^0 \rightarrow f}(t) = |A_f|^2 \left| \frac{p}{q} \right|^2 \frac{e^{-\Gamma t}}{2} \left((1 + |\lambda_f|^2) \cosh \frac{\Delta\Gamma t}{2} + 2\mathcal{R}e\lambda_f \sinh \frac{\Delta\Gamma t}{2} - (1 - |\lambda_f|^2) \cos \Delta m t + 2\mathcal{I}m \lambda_f \sin \Delta m t \right)$$

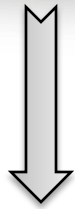
Les termes \rightarrow (sinh)
 \rightarrow (sin)

L'interférence entre les désintégrations avec et sans oscillation

Exemple d'interférence de K_L^0 et K_S^0

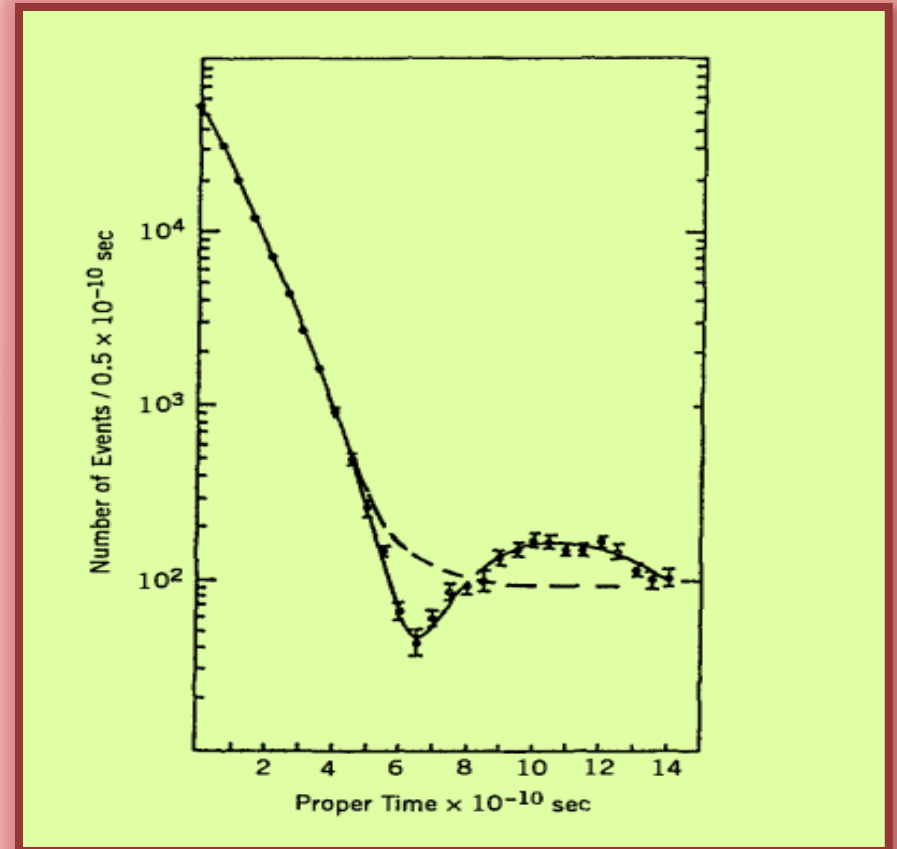


$$\left| (K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) + (K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) \right|^2$$



Les valeurs des phases relatives

$$\phi_{+-} \text{ Ou } \phi_{00}$$



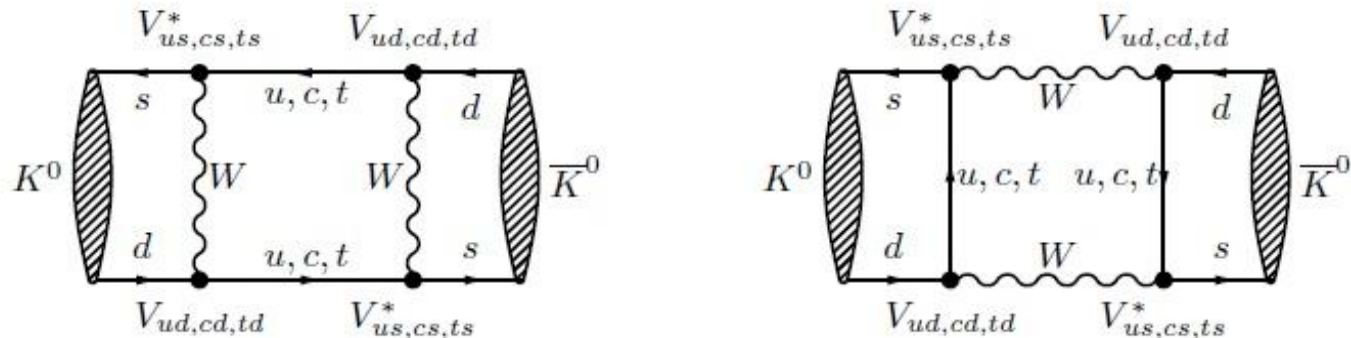
----- La courbe en pointillés (discret)

————— La courbe solide (continue)

L'AMPLITUDE POUR LE MÉLANGE

$$K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$$

$$\langle K^0 | H | \bar{K}^0 \rangle$$



$$\mathcal{M}_{uu} = i \left(\frac{-ig_W}{2\sqrt{2}} \right)^4 (V_{us}^* V_{ud} V_{us}^* V_{ud}) \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \left(\frac{-i g^{\lambda\sigma} - k^\lambda k^\sigma / M_W^2}{k^2 - M_W^2} \right) \left(\frac{-i g^{\alpha\rho} - k^\alpha k^\rho / M_W^2}{k^2 - M_W^2} \right) \left[\bar{u}_s \gamma_\lambda (1 - \gamma^5) \frac{(\gamma_\mu k^\mu + m_u)}{k^2 - m_u^2} \gamma_\rho (1 - \gamma^5) u_d \right] \left[\bar{u}_s \gamma_\alpha (1 - \gamma^5) \frac{(\gamma_\nu k^\nu + m_u)}{k^2 - m_u^2} \gamma_\sigma (1 - \gamma^5) u_d \right]$$

$$\mathcal{M}_{uu} = i \left(\frac{-ig_W}{2\sqrt{2}} V_{us}^* \right)^2 \left(\frac{-ig_W}{2\sqrt{2}} V_{ud} \right)^2 \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \left[\bar{u}_s \gamma_\lambda (1 - \gamma^5) \frac{(\gamma_\mu k^\mu + m_u)}{k^2 - m_u^2} \gamma_\rho (1 - \gamma^5) u_d \right] \times \left[\bar{u}_s \gamma_\alpha (1 - \gamma^5) \frac{(\gamma_\nu k^\nu + m_u)}{k^2 - m_u^2} \gamma_\sigma (1 - \gamma^5) u_d \right] \left(\frac{-i g^{\lambda\sigma}}{k^2 - M_W^2} \right) \left(\frac{-i g^{\alpha\rho}}{k^2 - M_W^2} \right)$$

La différence de masse $K_L^0 - K_S^0$

$$\Delta m_K = m_{K_L^0} - m_{K_S^0} = \langle K_L^0 | H | K_L^0 \rangle - \langle K_S^0 | H | K_S^0 \rangle$$

$$\Delta m_K = \frac{G_F^2 m_w^2}{6\pi^2} \eta_{QCD} B_K f_K^2 m_k [S_0(m_c^2/m_w^2) |V_{cd} V_{cs}|^2]$$

La formule générale pour ε_K est donnée par

$$\varepsilon_K = \frac{\exp\left(i\frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{2} \Delta m_K} (\text{Im}M_{12} + 2\xi \text{Re}M_{12})$$

L'élément hors diagonal M_{12}

$$2m_K M_{12}^* = \langle \overline{K^0} | H_{\text{eff}}^{|\Delta S|=2} | K^0 \rangle$$

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{\text{eff}}^{|\Delta S|=2} &= \frac{G_F^2}{16\pi^2} M_W^2 [\lambda_c^2 \eta_1 S_0(x_c) + \lambda_t^2 \eta_2 S_0(x_t) + 2\lambda_c \lambda_t \eta_3 S_0(x_c, x_t)] \\ &\times [\alpha_s^{(3)}(\mu)]^{-2/9} \left[1 - \frac{\alpha_s^{(3)}(\mu)}{4\pi} J_3\right] Q + hc \end{aligned}$$

$$M_{12} = \frac{G_F^2}{12\pi^2} B_K(\mu) f_K^2 m_K M_W^2 [\lambda_c^{*2} \eta_1 S_0(x_c) + \lambda_t^{*2} \eta_2 S_0(x_t) + 2\lambda_c^* \lambda_t^* \eta_3 S_0(x_c, x_t)]$$

Calcul de ε_K

$$\varepsilon_K \sim \frac{\Im M_{12}}{\sqrt{2} \Delta m_K}$$

$$\varepsilon_K = C_\varepsilon B_K \Im \lambda_t \{ \Re \lambda_c [\eta_1 S_0(x_c) - \eta_3 S_0(x_c, x_t)] - \Re \lambda_t \eta_2 S_0(x_t) \} \exp(i\pi/4)$$

$$C_\varepsilon = \frac{G_F^2 f_K^2 m_K M_W^2}{6\sqrt{2} \pi^2 \Delta m_K}$$

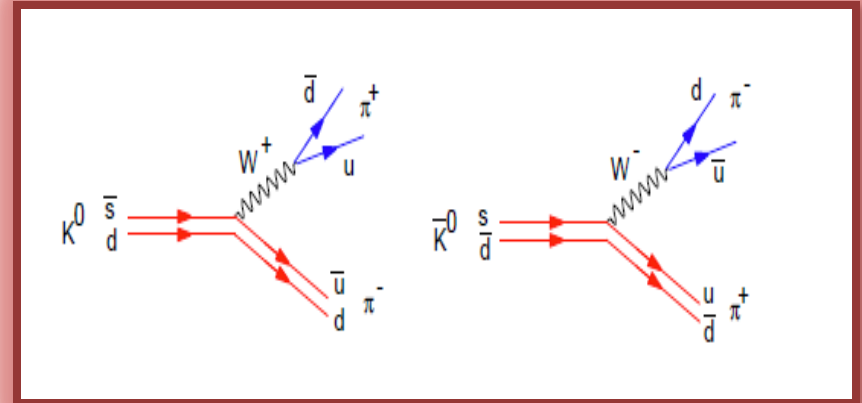
$$\varepsilon_K \approx 1.66 \times 10^{-3}$$

L'AMPLITUDE POUR LA DÉSINTÉGRATION

K^0 et \bar{K}^0

$$M = \frac{G_F}{\sqrt{2}} f V_{us}^* V_{ud} \bar{u}_s \gamma^\mu (1 - \gamma^5) u_u \bar{v}_u \gamma_\mu (1 - \gamma^5) u_d$$

$$M = \frac{G_F}{\sqrt{2}} f V_{ud}^* V_{us} \bar{u}_s \gamma^\mu (1 - \gamma^5) u_u \bar{v}_u \gamma_\mu (1 - \gamma^5) u_d$$



L'expression de la largeur totale

$$\Gamma(K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) = \frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{us}^* V_{ud}|^2 f^2$$

$$\Gamma(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) = \frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{ud}^* V_{us}|^2 f^2$$

Mesure de ε'/ε

$$\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{\Gamma(K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) - \Gamma(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) + \Gamma(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)} = \frac{\frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{us}^* V_{ud}|^2 f^2 - \frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{ud}^* V_{us}|^2 f^2}{\frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{us}^* V_{ud}|^2 f^2 + \frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{ud}^* V_{us}|^2 f^2}$$

L'INTERFÉRENCE ENTRE LA DÉSINTÉGRATION ET LE MÉLANGE

Calcul de λ_f

$$\lambda_f = \varepsilon_K \times \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$$

$$\lambda_f = (C_\varepsilon B_K \Im m \lambda_t \{ \Re \lambda_c [\eta_1 S_0(x_c) - \eta_3 S_0(x_c, x_t) - \Re \lambda_t \eta_2 S_0(x_t)] \} \exp(i\pi/4))$$

$$\times \left(\frac{\frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{us}^* V_{ud}|^2 f^2 - \frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{ud}^* V_{us}|^2 f^2}{\frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{us}^* V_{ud}|^2 f^2 + \frac{G_F m_s^5}{192 \pi^3} |V_{ud}^* V_{us}|^2 f^2} \right)$$

$$\lambda_f = 1.66 \times 10^{-3} \left(\frac{|V_{us}^* V_{ud}|^2 - |V_{ud}^* V_{us}|^2}{|V_{us}^* V_{ud}|^2 + |V_{ud}^* V_{us}|^2} \right)$$

$$V_{ij} \neq V_{ij}^*$$

$$\lambda_f \neq 0$$

⇒ l'interférence existe dans ce cas

CONCLUSION

7

Nous avons étudié dans ce mémoire le phénomène **d'interférence** pour les **mésons K** qui est considéré comme une **phase relative** entre **l'amplitude** de **mélange** et **L'amplitude** de **désintégration**. On trouve que ce type de violation de CP peut être introduit à partir de **désintégration pur** ou bien d'une **désintégration avec mélange**.

Enfin on résulte que:

- La quantité d'asymétrie théoriquement très intéressante car elle est directement liée aux éléments de la matrice CKM.
- Le calcul des paramètres (ϵ) et (ϵ'/ϵ) est très compliqué en raison de la présence d'éléments matriciels hadroniques en particulier.
- L'interférence particulièrement intéressante le système $B^0 \bar{B}^0$

شكراً
والحمد لله
الجليل

MERCI DE VOTRE ATTENTION